

□原著□

間欠的陽圧換気と定常流換気の組み合わせによる 最高気道内圧低下作用 —モデル肺による検討—

槇田 浩史* 横山 訓典* 豊岡 秀訓* 天羽 敬祐*

ABSTRACT

Effect of the Combination of Intermittent Positive-pressure Ventilation and Constant-flow Ventilation on Peak Airway Pressure in a Model Lung

Koshi MAKITA, Kuninori YOKOYAMA, Hidenori TOYOOKA and Keisuke AMAHA

Department of Anesthesiology and Critical Care Medicine, Tokyo Medical and Dental University, School of Medicine

High peak airway pressure in acute lung injury patients worsens pulmonary damage and may lead to barotrauma. Gas insufflation in the trachea reduces the tidal volume of conventional mechanical ventilation by reducing the dead space fraction of each breath. We studied the effect of the combination of intermittent positive-pressure ventilation and constant-flow ventilation on peak airway pressure in a model lung.

Carbon dioxide was infused (200 ml/min) into the model lung and mixed by a fan. The model lung was ventilated with a Servo 900 C ventilator at a respiratory rate of 10/min. Tidal volume was adjusted to maintain P_{aCO_2} 40 mmHg which was measured from a sampling port of the model lung. A constant flow was delivered through a catheter inserted into the trachea of the model lung. We studied three catheter positions and five gas flow rates (0-10.8 liters/min).

Tidal volume and peak airway pressure were reduced by increasing the gas flow rate. The decrease in peak airway pressure was larger when the catheter tip was positioned deeply in the trachea of the model lung. However, in a clinical setting large constant flow in the trachea may increase end-expiratory alveolar pressure because of an increase in expiratory respiratory resistance. This method was useful to reduce tidal volume and peak airway pressure in our model lung, but it seemed necessary to modify the method to apply to patients of respiratory failure.

成人型呼吸窮迫症候群 (ARDS) の治療にあたって酸素化能を改善するために、呼気終末陽圧 (PEEP) と持続的陽圧換気 (CPPV) が一般的

に使用される。しかし、重傷化した ARDS 患者では、肺コンプライアンスが低下しているため、このような人工呼吸法では最高気道内圧の上昇が避けられない。高い気道内圧は、気胸などの圧外傷、心拍出量低下、肺水腫の悪化¹⁾²⁾をもた

* 東京医科歯科大学医学部麻酔・蘇生学教室

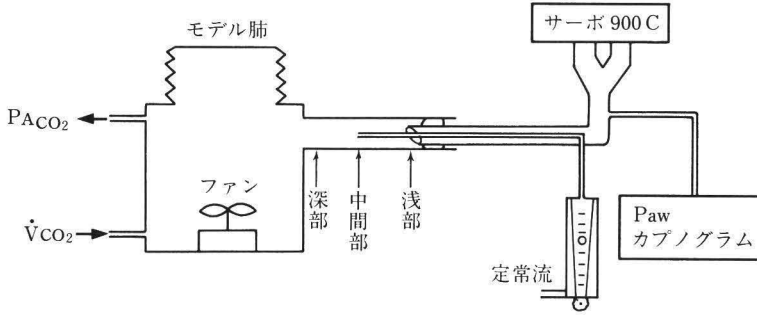


図 1 実験の模式図

らすといわれており、重傷の呼吸不全患者の人工呼吸では、最高気道内圧の過度の上昇を防ぐことが呼吸管理上の目標のひとつになる。とくに圧外傷が発生すると、呼吸管理は困難を極め、患者の予後はさらに悪化する。そこで、最高気道内圧の上昇を防ぐために、これまで高頻度陽圧換気法 (HFPPV)、高頻度振動呼吸法 (HFO)、高頻度ジェット換気法 (HFJV)、permissive hypercapnia などいろいろと工夫されてきた。今回著者らは、間欠的陽圧換気と定常流換気を組み合わせる換気法により、最高気道内圧およびカプノグラムの変化をモデル肺を使用して調べた。

方 法

モデル肺 (アコマ製) は、直径 18 cm、高さ 22 cm のアクリル性の円筒の上部に直径 16 cm のゴム性蛇腹の肺があり、アクリルの円筒の横に気管 (容積約 60 ml) を模した直径 2.4 cm の円筒をつけたものを作製した (図 1)。さらにモデル肺には、炭酸ガスを流し込むための側孔、炭酸ガスを混ぜるためのファン、モデル肺内のガスサンプリングのための側孔を取り付けた。このモデル肺の気管にカプ付き気管内チューブを挿入し、サーボ 900 C で人工呼吸を行った (図 1)。このときの死腔は、気管、気管内チューブ、接続コネクター類を合わせて約 120 ml であった。モデル肺には、毎分 200 ml の炭酸ガスを流し込むことによって炭酸ガス排出量とし、サンプリングポートよりモデル肺内の炭酸ガス分圧を測定して肺胞炭酸ガス分圧 (P_{ACO_2}) とした。呼吸回数は毎分 10 回、吸気：呼気比 1：2 とし、サーボ 900 C に

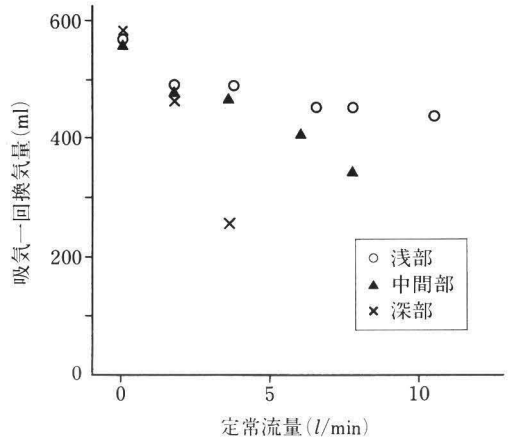


図 2 定常流量およびカテーテル位置と一回換気量の関係

よる一回換気量は P_{ACO_2} が 40 mmHg になるように調節した。定常流として、気管内チューブと人工呼吸器の接続部から挿入した外形 2.8 mm のポリエチレンチューブから酸素を流した。流量は 0-8 l/min で段階的に変化させ、またポリエチレンチューブの先端の位置をモデル肺の気管の深部、中間部、浅部の 3 箇所に変化させて調べた。測定は、最高気道内圧およびカプノグラムをカプノマックウルティマ (Datex 社) によって行った。サーボ 900 C による吸気量をサーボ 900 C によって測定し、これに吸気時間中の定常流による換気量を計算して加えた量を吸気一回換気量とした。

結 果

ポリエチレンチューブの先端を深く入れるほど、また定常流を増やすほど、 P_{ACO_2} を一定に

表 定常流とカテ先を変化させたときの吸気一回換気量と最高気道内圧の変化

	PACO ₂ /呼吸数 (mmHg)/(回/min)	定常流 (l/分)	吸気一回換気量 (ml)	最高気道内圧 (cmH ₂ O)
カテ先浅部	41/10	0	567	18
	41/10	1.8	494	16
	41/10	3.8	487	15
	41/10	6.6	453	14
	41/10	7.8	456	14
	41/10	10.5	438	13

カテ先中間部	40/10	0	562	18
	40/10	1.8	493	16
	40/10	3.6	468	15
	40/10	6.0	409	13
	41/10	7.8	346	11

カテ先深部	40/10	0	578	19
	39/10	1.8	476	15
	39/10	3.7	247	9
	22/ 0	6.8	—	0

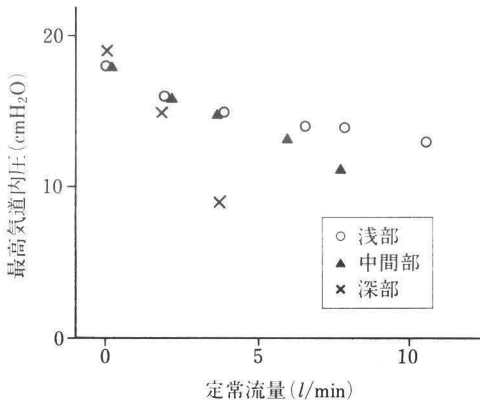


図3 定常流量およびカテーテル位置と最高気道内圧の関係

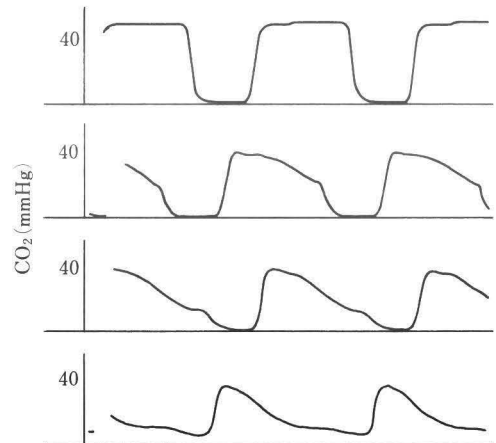


図4 カプノグラムの一例（カテーテル先端が気管内の中間部にあるとき、定常流量：上段より0, 1.8, 3.6, 7.8 l/minのとき）

保つための吸気一回換気量（人工呼吸器による吸気量と定常流による吸気量の和）を減少させることができた（図2）。カテーテルの先端が浅部のときには、定常流が10.5 lで一回換気量を20%減少させることができた。中間部のときには、定常流7.8 lで約40%減少、深部の時には6.8 lで人工呼吸器による換気が必要なくなった（表）。また吸気換気量の減少によって、それと同程度最高気道内圧を低下させることができた（図3およ

び表）。カプノグラムの波形は、プラトー部の右肩部分が欠ける形となった（図4）。定常流が増加するほど、また先端を深く入れるほどかける部分が大きくなった。

考 察

気管内に定常流を流す換気法としては、Sznajder らの constant flow ventilation-continuous positive pressure ventilation (CFV-CPPV)³⁾、Nahum らの tracheal gas insufflation-pressure control ventilation (TGI-PCV)⁴⁾、Kolobow らの intratracheal pulmonary ventilation (ITPV)⁵⁾ などがあり、動物実験モデルで気道内圧低下に関して良好な結果を得ている。Sznajder らの CFV-CPPV では、犬のオレイン酸肺水腫モデルを用いて、気管分岐部の上方 2~5 cm において 1.57 l/kg/min の定常流を流しながら CPPV を行ったところ、同じ Paco_2 を保つのに一回換気量を 58% (437 ml から 184 ml に)、最高気道内圧を 31% (26 cmH_2O から 18 cmH_2O に) 減少させることができた。彼らの方法は、定常流換気 (CFV) を行っているときに、定常流の出口の抵抗を変えることによって少量の tidal ventilation を CFV に加える方法である。気管分岐部より上での CFV だけでは達成できない、より末梢レベルの死腔のガス混合を小さな tidal ventilation によって行い、死腔の洗い出し効果を高めているのが特徴である。この方法では著者らの方法と違って、定常流の量を増やしても一回換気量はそれほど増えないという利点があるが、比較的大量の定常流を使用しなければならないという欠点がある。

一方、CFV を行うと流量に比例して肺胞内圧が上昇し、気道内圧と肺胞内圧の差が 10 cmH_2O にまで達することがある³⁾⁶⁾。また、気管内チューブ径が小さくなると CFV によって肺胞内圧が上昇するという欠点がある。この理由として、次の3点が挙げられている。第1に、定常流のジェット流の運動量が肺胞に伝達される。第2に、気管内チューブ内のカテーテルによってチューブの断面積が減少し、呼吸抵抗が増加する。第3に、カテーテルからの定常流が肺からの呼気の流れを妨害する。このうちの第1と第3の点を克服するために Kolobow らは reverse thrust catheter (RTC) を考案し、これを気管内に挿入して換気を行う intratracheal pulmo-

nary ventilation を提唱した。この方法は、カテーテルの先端が特殊に作られていて、呼気中に定常流のジェットの方向が気管分岐部の方向ではなく出口の方向を向いているので、ベンチュリー効果で呼気を促進するようになっている。彼らは、人工肺から離脱できなかった患者にこの方法を使用して、良好な結果を得ている⁷⁾。

また、Nahum らは、15 cmH_2O という一定の pressure control ventilation 中に気管内に挿入したカテーテルに 2, 5, 10 l/min の定常流を流す方法を犬の実験で行い、炭酸ガス排出効果を検討している。定常流が多いほど Paco_2 低下効果は大きかった (15~35 mmHg の低下) が、カテーテル先端を気管分岐部上 1, 5, 10 cm と変えても大きな違いはなかったとしている。彼らの実験では、対照時の人工呼吸設定が 15 cmH_2O の PCV, PEEP 4 cmH_2O , 呼吸数 40 回/分, 吸気時間分画が 0.3 であった。このときの死腔率は 0.8 あり、 Paco_2 が 67 mmHg という高い条件で実験を行っており、定常流による Paco_2 低下効果が現われやすかったと考えられる。彼らは、permissive hypercapnia 中の炭酸ガス蓄積を少しでも小さくするのに役立つのではないかと提案している。

著者らのモデル肺による実験でも定常流を増加させるほど、またカテーテルの先端を深く挿入するほど吸気一回換気量および気道内圧を低下させることができた。これは気道の死腔部分の CO_2 を呼気時の定常流が洗い出すためと考えられる。カテーテル先端を深部にすると、低流量の定常流のみで CO_2 排泄が可能となったが、臨床的にはこのような状態は不可能と思われる。臨床的に容易にできる方法としては、気管分岐部より上で定常流を流す方法であり、著者らのモデルではカテーテルが浅部にあるときに相当する。しかし、著者らの方法では定常流を増加させると、定常流による吸気換気量が増加する。また、呼吸抵抗に対する工夫を行わなかったため、定常流の増加によって肺胞内圧が上昇することが考えられる。ARDS 末期のような肺胞死腔が増加した患者では、 Paco_2 と PETCO_2 の差が大きいため、定常流による死腔減少効果は小さくなり、気道内圧低

下作用は小さくなると考えられた。そこで Sznajder らの方法や、Kolobow らの方法や、Nahum らの方法のような工夫が必要と考えられたが、なかでも Nahum らの方法が比較的容易に行うことができ、彼らがいうように permissive hypercapnia と組み合わせて使うと、重傷患者にも効果が期待できると思われた。

定常流を併用した換気法の臨床上の問題点としては、吸気酸素濃度を人工呼吸器と定常流で同じ値にする工夫と、定常流の加湿をする工夫が必要である。また、定常流によって肺胞内圧が上昇するが気道内圧は低く保たれることがあるので、肺胞内圧が過小評価される危険性がある点に注意する必要がある。

参考文献

- 1) Dreyfuss D, Soler P, Basset G, et al : High inflation pressure pulmonary edema. Respective effects of high airway pressure, high tidal volume, and positive end-expiratory pressure. *Am Rev Respir Dis* 137 : 1159-1164, 1988
- 2) Parker JC, Townsley MI, Rippe B, et al : Increased microvascular permeability in dog lungs due to high peak airway pressure. *J Appl Physiol* 57 : 1809-1816, 1984
- 3) Sznajder JI, Becker CJ, Crawford GP, et al : Combination of constant-flow and continuous positive-pressure ventilation in canine pulmonary edema. *J Appl Physiol* 67 : 817-823, 1989
- 4) Nahum A, Ravenscraft SA, Nacos G, et al : Tracheal gas insufflation during pressure-control ventilation. Effect of catheter position, diameter, and flow rate. *Am Rev Respir Dis* 146 : 1411-1418, 1992
- 5) Kolobow T, Powers T, Mandava S, et al : Intratracheal pulmonary ventilation (ITPV) : Control of positive end-expiratory pressure at the level of the carina through the use of a novel ITPV catheter design. *Anesth Analg* 78 : 455-461, 1994
- 6) Nahum A, Sznajder JI, Solway J, et al : pressure, flow, and density relationships in airway models during constant-flow ventilation. *J Appl Physiol* 64 : 2066-2073, 1988
- 7) Wilson JM, Thopson JR, Schnitzer JJ, et al : Intratracheal pulmonary ventilation and congenital diaphragmatic hernia : a report of two cases. *J Pediatr Surg* 28 : 448-457, 1993